

惠民凹陷临南洼陷 T_6 反射层断裂分形特征与有利储层预测

马晓骥¹,倪金龙^{1*},张凯¹,王智敏²

(1.山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室,山东 青岛 266510;
2.中国石化胜利油田分公司 临盘采油厂,山东 德州 251507)

摘要:断裂活动对于油气的运移与聚集至关重要,然而伴随断裂活动形成的大量裂缝对于储集空间的改善,及由此而形成的有利储层的预测却没有引起足够的重视。基于分形几何学的基本理论与方法,对惠民凹陷临南洼陷 T_6 反射层(沙三段中亚段)断裂分形特征进行了定量分析,结合已知油气藏的分布及沉积相特征,探讨了断裂分形值的特征及其与油气储集空间分布之间的联系,并对由于断裂活动形成的有利储层的分布进行了预测。结果表明,研究区断裂构造在0.187 5~1.5 区间内具有良好的自相似性,相关系数大多大于0.970;且分形值越大,断裂发育的复杂程度越高。断裂分形值的变化特征与断裂的发育规律具有相关性,研究区中部洼陷的有利储层主要分布于分形值为1.1~1.4的等值线闭合圈内,南、北两侧有利储层分布于分形值大于1.2的等值线闭合圈内;断裂分形值为0.8~1.4的断裂构造部位是该区油气聚集的优势区,分形值大于1.4的部位是油气运移的区域;结合沉积相特征,预测夏224井区以西、夏53井区以南、街斜201井区以南等是目前油气勘探的有利区带。

关键词: T_6 反射层 沙三段中亚段 断裂分形特征 分形值 有利储层 临南洼陷

中图分类号:TE111.2

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2015)01-0052-05

Fractal characteristics of fracture and favorable reservoir prediction of seismic reflection layer T_6 in Linnan subsag, Huimin sag

Ma Xiaoqi¹, Ni Jinlong¹, Zhang Kai¹, Wang Zhimin²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Qingdao City, Shandong Province, 266510, China; 2. Linpan Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dezhou City, Shandong Province, 251507, China)

Abstract: Faulting is essential for the migration and accumulation of oil and gas. However, expanding space of reservoir resulted from a number of cracks being formed with faulting and the prediction of favorable reservoir formed have not been paid enough attention. Based on the basic theories and methods of fractal geometry, the fractal fracture characteristics of the seismic reflection layer T_6 in Linnan subsag of Huimin sag, Bohai Bay Basin (middle section of the third member of Shahejie Formation) has been analyzed quantitatively. The relationship between fractal dimension values of fracture and the proved oil and gas reservoirs distribution has been discussed and the favorable reservoir space resulted from faulting has been predicted. The results show that the fault structures in the research area within the measurement section of 0.187 5–1.5 km have good self-similarity and the correlation coefficients are generally above 0.970. The larger the value of fractal dimension, the more complex the fault structure. The fractal dimension value correlates with the fracture development. The

收稿日期:2014-11-05。

作者简介:马晓骥(1988—),男,山东梁山人,在读硕士研究生,从事构造地质学研究。联系电话:18764271521, E-mail:58763789@qq.com。

*通讯作者:倪金龙(1974—),男,安徽桐城人,副教授,博士,从事构造地质学相关教学与研究。联系电话:15954813207, E-mail:nijlqd@163.com。

基金项目:山东省自然科学基金项目“济阳拗陷惠民—东营凹陷中央隆起带差异隆升机制研究”(ZR2013DM007),山东省沉积成矿作用与沉积矿产实验室项目“东营—惠民凹陷中央隆起带剥蚀量恢复及隆升差异研究”(DMSM201005)。

favorable reservoir in the middle of the sag distributes within the closed contours ranging from 1.1 to 1.4. The favorable reservoir in the south and the north of the sag distributes within the closed contours above 1.2. The fault structure positions with fractal dimensions between 0.8 and 1.4 in this area are the advantage areas for oil and gas accumulation, and the positions with fractal dimensions above 1.4 are the areas for oil and gas migration. The area, where is west to Well Xia224 and south to Well Xia53 and Well Jiexie201, is predicted to be the favorable crack for hydrocarbon exploration combining with sedimentary features.

Key words: seismic reflection layer T₆; fmiddle section of the third member of Shahejie Formation; fractal fracture characteristics; dimension value; favorable reservoir; Linnan subsag

分形几何学由法国数学家 Mandelbrot 创立^[1], 主要用于研究一些具有相似性的不规则曲线、具有自仿射性的分形集、具有自反演性的不规则图形等。近年来,分形理论中的相似性特点被应用到自然科学与社会科学等多个领域,并为自然界中不规则的、高度复杂的非线性现象提供了一种定量的描述手段^[2-3]。其中,分形理论在地质领域的广泛应用主要体现在油气勘探、运移、储集和预测等方面^[4-7],如断裂性质及走向与分形维数的关系^[8]、断裂体系的分形特征与深源气的运移条件^[5]、断裂分形特征与油气盆地的分布关系^[9]等。

临南洼陷是惠民凹陷一个重要的次级构造单元,洼陷内及周缘是胜利油区一个重要的产油区^[10]。目前,临南洼陷已发现的油气藏大多为构造油气藏及少量的隐蔽油气藏。随着勘探的不断深入,寻找新的油气藏迫在眉睫。基于油气成藏的基本理论,良好的储层是油气藏形成的一个必要条件,如连通性好的砂岩。然而,裂缝的广泛发育可以改善连通性弱的岩石,如泥岩、灰岩等,使其具备储层条件。因此,裂缝型储层也是油田勘探的一个重要目标。但是裂缝既可以改善储层特征,也可以作为油气运移的通道,因此寻找有利的构造储集空间是急需解决的问题。断裂的分形几何学研究表明,可以根据已经识别出的断裂特征推测未知的断裂发育情况,结合已知油气藏的特征与分布情况^[11-13],可以预测有利储层分布区。基于临南洼陷沙河街组T₆反射层(沙三段中亚段)断裂分布特征,根据分形几何学理论,结合油气藏分布、沉积相发育特征等方面的综合分析,预测了有利储层的可能发育位置。

1 区域地质概况

临南洼陷位于惠民凹陷西南部,惠民凹陷中央隆起带与曲堤地垒之间,是惠民凹陷最为重要的洼陷之一,发育临南斜坡带、夏口断裂带、临南洼陷带和中央隆起带4个次级构造单元(图1)。研究区断

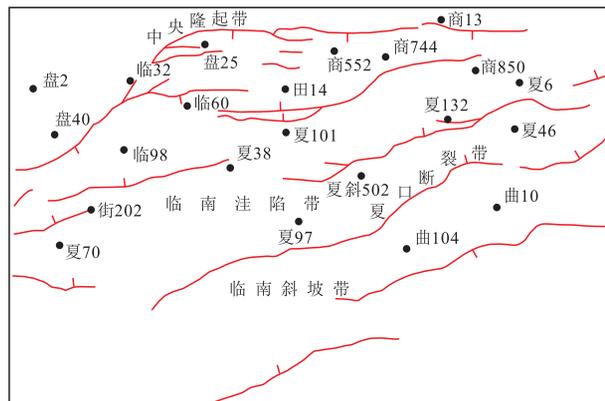


图1 临南洼陷区域构造纲要

Fig.1 Structure outline map of the Linnan subsag

裂为北北东向,形态和规模受北倾的临商断裂带和南倾的夏口断层控制。在洼陷的形成过程中,发育了完整的古近系和新近系,由下到上依次为孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组和明化镇组^[14]。其中,沙三段形成了多套生、储、盖组合,从当前已探明的油气藏来看,有利储层与断裂构造有密切关系。

2 断裂系统分维值计算

岩石所受地应力超过临界值后会产生破裂,并且产生位移,进而形成断裂^[15-16]。从几何学角度进行观察,断层的空间特征实质上是一系列无规则展布的面状几何体或线状集合,可将这些无规则形状的几何集合视为分形体,根据分形几何学的方法定量求取分形体空间分布特征的分维值^[7]。分维值作为分形几何学中一个重要的评价参数,可以通过盒维、信息维、关联维等方法^[17-20]进行计算。笔者采用最常用的盒维法^[3],具体做法是以不同尺度(r)的正方形格子依次覆盖断裂平面分布图,统计出覆盖分形体所需的盒子数($I(r)$),并根据计算得到一系列 $[\ln r, \ln I(r)]$;在双对数坐标系中,用最小二乘法对 $\ln r - \ln I(r)$ 的关系进行表征,可以借助相关系数来判断这种线性关系的关联性,相关系数越趋近于1

表明关联性越好,而该直线的斜率就是所求的分维值(D)^[21]。

将临南洼陷T₀反射层断裂平面分布图以实际边长为3 km×3 km的正方形划分出127个评价方格(图2),并以实际边长分别为1.5, 0.75, 0.375, 0.187 5 km的方格覆盖,求出各评价方格的分维值(表1)。从表1可以看出,各个评价方格的分维值为0.575~1.683,相关系数大部分大于0.970,说明断裂复杂程度与分维值具有良好的线性关系,进而表明研究区断裂构造具有良好的自似性和分形分布特征。各评价方格分维值不同表明各单元格内断裂发育在分形几何特征上存在差异。82, 83, 96, 97, 98号方格内有不同走向的三、四级断裂密集发育,分维值为1.142~1.683;而断裂发育相对较少的115, 116, 127号方格分维值均小于1.000,这验证了分维值体现断裂构造复杂程度的结论^[18]。

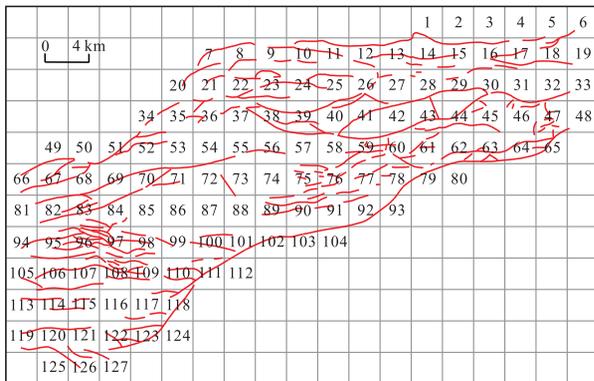


图2 临南洼陷断裂分形特征评价单元划分

Fig.2 The assessment unit division diagram of fractal dimension of fracture in the Linnan subsag

表1 临南洼陷T₀反射层断裂分维值统计
Table1 The fractal dimension statistics of fracture in the reflection layer T₀, Linnan subsag

方格编号	分维值	相关系数	方格编号	分维值	相关系数
1	0.910	0.982	67	1.194	0.991
5	1.059	0.993	70	1.182	0.993
9	0.725	0.993	76	1.324	0.979
16	1.264	0.997	79	1.133	0.990
20	0.891	0.998	82	1.142	0.995
25	0.977	0.999	83	1.397	0.983
28	1.107	0.998	96	1.683	0.991
35	0.952	0.974	97	1.462	0.987
39	1.157	0.997	98	1.200	0.989
45	0.575	0.899	101	1.097	0.989
47	1.242	0.994	106	1.193	0.977
52	1.421	0.978	115	0.885	0.992
57	0.891	0.998	116	0.797	0.973
60	1.248	0.992	121	0.783	0.996
63	1.359	0.992	127	0.942	0.997

3 断裂分形特征与储层分布

3.1 储层分布与断裂系统分维值的关系

断裂系统分维值表征了含油气盆地中不同时期构造演化的强弱及断裂发育的叠置性和新生性,而断裂对油气的聚集有明显的控制作用^[22-24]。因此,断裂的分维值必然与储层分布之间存在某种联系,探寻二者之间的联系,可以作为评价油气分布和富集规律的一个重要参数^[8]。

基于临南洼陷T₀反射层已探明油气藏的分布与断裂分维值等值线叠合结果(图3),从洼陷内油

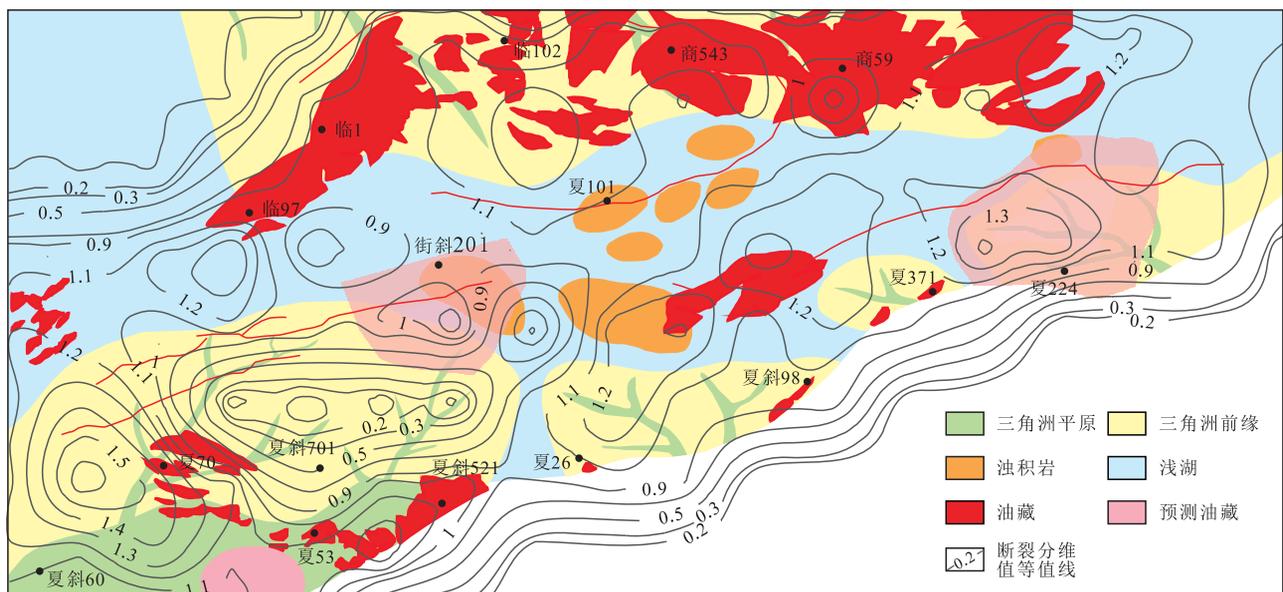


图3 临南洼陷沙三段中亚段沉积相、油气藏分布与断裂分维值等值线叠合及有利储层预测

Fig.3 A composite map of sedimentary facies, hydrocarbon distribution, fractal dimension contour of fracture and favorable reservoir prediction for the middle section of the third member of Shahejie Formation in Linnan subsag

气藏宏观分布趋势来看,分维值大于1.2形成的等值线闭合圈有10个,其中8个与已探明油气藏重合;洼陷北部有利储层主要分布在分维值大于1.2的等值线闭合圈内或偏北靠近中央隆起带翼部;洼陷南部有利储层总体分布在分维值大于1.2的等值线闭合圈内或偏南靠近夏口断层部位;洼陷中部有利储层主要分布在分维值为1.1~1.4的等值线闭合圈内。

根据现有钻井资料,并结合沙三段中亚段沉积相发育特征(图3)发现,油气主要分布在三角洲前缘亚相和浅湖亚相。临97和夏斜98井区位于与前三三角洲毗邻的浅湖亚相,其断裂分维值为0.8~1.3;商59、商543、临102和夏70井区位于三角洲前缘亚相,其断裂分维值为0.8~1.4;夏斜521和夏53井区位于三角洲平原边缘,与三角洲前缘毗邻,其断裂分维值为1.0~1.4。以上规律表明,临南洼陷有利储层的分布与断裂分形特征的联系主要表现为:断裂分维值为0.8~1.4有利于裂缝型储层的形成。将断裂分维值与沉积相、岩石成分和结构等因素互相结合,可以得出进一步的规律:临南洼陷浅湖亚相断裂分维值为0.8~1.3有利于储集空间的改善;三角洲前缘亚相断裂分维值为0.8~1.4有利于储集空间的改善;三角洲平原亚相断裂分维值为1.0~1.4有利于储集空间的改善。上述现象产生的原因可能与不同沉积亚相岩石成分的均一性、粒度、孔隙度等差异有关,对于分选性较好的砂岩,不需要较高的断裂分维值就可以有良好的储集性能,但是对于分选性不好的砂岩来说,如浅湖亚相沉积岩,较高的断裂分维值意味着储集空间的有效改善。但断裂对储集空间的改善不是无限制的,如果断裂分维值过高(如大于1.4),则可能导致小型裂缝贯穿形成较大规模的断裂,从而形成油气运移的通道,不利于油气藏的聚集。

3.2 有利储层预测

含油气盆地断裂分形特征研究的重要目的,就是通过分析断裂体系分形特征与已知油气藏储集空间存在的相互关系,进而预测盆地中潜在的油气分布和富集的有利区域^[5]。临南洼陷街斜201井区以南地区处于浅湖亚相和三角洲前缘亚相内,其断裂分维值为1.068~1.210;夏224井区位于三角洲前缘亚相内,并处于断裂分维值为1.128~1.432的等值线闭合圈内;夏53井区以南地区与夏斜521井区、夏53井区同处于三角洲平原亚相内,且构造部位相同,处于断裂分维值为1.0~1.2的等值线闭合圈内。

通过综合分析分形特征与构造带、沉积相组合3方面的因素认为,街斜201井区以南、夏224井区以西、夏53井区以南地区可作为临南洼陷未来有利储层的重点勘探地区(图3)。

4 结论

在方格尺度为0.1875~1.5 km时,利用盒维法计算的惠民凹陷临南洼陷T₀反射层(沙三段中亚段)各评价单元的分维值为0.575~1.683,相关系数多大于0.970,说明断裂发育具有良好的分维自似性,分形特征明显,应用分形理论研究临南洼陷T₀反射层(沙三段中亚段)断裂系统的空间分布是可行的。断裂分维值形成的等值线圈闭与油气分布在界定范围内有一致性。断裂分维值为0.8~1.4有利于裂缝型储层的形成;分维值大于1.4时,断裂对改善油气通道的运移作用大于储集作用。临南洼陷沙三段中亚段油气成藏区多集中在三角洲前缘亚相、浅湖亚相。其中,分布于浅湖亚相的油气藏更能体现断裂对储层的改善作用。预测街斜201井区以南、夏224井区以西、夏53井区以南等地区是有利储层的分布区。

参考文献:

- [1] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967, 156(3775): 636-638.
- [2] 王域辉, 廖淑华. 分形与石油[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 3-98.
Wang Yuhui, Liao Shuhua. Fractal and oil[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 3-98.
- [3] 孙洪泉. 分形几何与分形插值[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1-30.
Sun Hongquan. Fractal geometry and fractal interpolation[M]. Beijing: Science Press, 2011: 1-30.
- [4] 徐兵. 塔里木盆地塔中地区断裂分形特征[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(4): 35-37.
Xu Bing. Fractal analysis of fault system in Tazhong area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(4): 35-37.
- [5] 徐景祯, 刘晓冬, 陈章明, 等. 断层体系的分形维数及其对深源气运移条件的指示作用[J]. 沉积学报, 1998, 16(1): 76-80.
Xu Jingzhen, Liu Xiaodong, Chen Zhangming, et al. Fractal dimensions of fault systems and their hints to migration conditions of gas from deep source rocks[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(1): 76-80.
- [6] 刘晓冬, 徐景祯, 王兴涛. 分形方法预测气田数量及其储量[J]. 石油学报, 2000, 21(2): 42-44.

- Liu Xiaodong, Xu Jingzhen, Wang Xingtao. The characteristics of petroleum system in faulted basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2000, 21(2): 42-44.
- [7] 马新仿, 张士诚, 郎兆新. 孔隙结构特征参数的分形表征 [J]. *油气地质与采收率*, 2005, 12(6): 34-36.
Ma Xinfang, Zhang Shicheng, Lang Zhaoxin. Fractal characterization of characteristic parameters of pore structure [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(6): 34-36.
- [8] 陈新, 卢华复, 浦世照, 等. 准噶尔盆地西北缘断裂体系分形特征与油气藏分布 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(4): 517-521.
Chen Xin, Lu Huaifu, Pu Shizhao, et al. Fractal characteristics and reservoir distribution of fault system in the northwest margin of Jungar basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(4): 517-521.
- [9] 姚衍桃, 詹文欢. 南海南部断裂的分形研究 [J]. *海洋学报: 中文版*, 2007, 29(2): 59-66.
Yao Yantao, Zhan Wenhuan. Fractal analysis of faults in the southern part of the South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(2): 59-66.
- [10] 滕建彬. 基于低渗透成因分析的储层分类方法——以临南洼陷带沙三段下亚段碎屑岩储层为例 [J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(5): 6-9.
Teng Jianbin. Classification and guiding significance based on primary micro-factors of low-permeability reservoir—case study on lower Sha3 reservoir in Linnan depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(5): 6-9.
- [11] 倪金龙, 夏斌. 断块运动与潜山油气藏的形成——以渤海湾盆地为例 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(2): 32-35.
Ni Jinlong, Xia Bin. Fault block movement and formation of buried hill hydrocarbon reservoir: Taking Bohai Bay basin as an example [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(2): 32-35.
- [12] 倪金龙, 周莉, 赵小花, 等. 柴达木盆地红沟子鼻状构造新生代油气成藏特征 [J]. *天然气地球科学*, 2008, 16(1): 107-110.
Ni Jinlong, Zhou Li, Zhao Xiaohua, et al. Features of Cenozoic hydrocarbon accumulation in Honggouzi structure, Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 16(1): 107-110.
- [13] Ni Jinlong, Guo Ying, Wang Zhimin, et al. Tectonics and mechanisms of uplift in the central uplift belt of the Huimin Depression [J]. *Journal of Earth Science*, 2011, 22(3): 299-315.
- [14] 封东晓. 临南洼陷南部沙三段下亚段储层综合评价 [J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(1): 33-36.
Feng Dongxiao. Comprehensive evaluation of lower Sha3 reservoir in south Linnan depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(1): 33-36.
- [15] Grimmer J C, Ratschbacher L, McWilliams M, et al. When did the ultrahigh-pressure rocks reach the surface? A $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ zircon, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ white mica, Si-in-white mica, single-grain provenance study of Dabie Shan synorogenic foreland sediments [J]. *Chemical Geology*, 2003, 197(1/4): 87-110.
- [16] Crider J G, Peacock D C P. Initiation of brittle faults in the upper crust: a review of field observations [J]. *Journal of Structural Geology*, 2004, 26(3): 691-707.
- [17] Mandelbrot B B. *The fractal geometry of nature* [M]. New York: W H Freeman and Company, 1982: 1-35.
- [18] 李士勇. *非线性科学与复杂性科学* [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 3-18.
Li Shiyong. *Nonlinear science and complexity science* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 3-18.
- [19] 武昱东, 琚宜文, 侯泉林, 等. 断层分层信息维及其在深部煤炭开采地质条件预测中的应用 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(8): 1 323-1 330.
Wu Yudong, Ju Yiwen, Hou Quanlin, et al. Application of fault's information dimensions among different coal seams in the prediction of deep coal resources exploitation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(8): 1 323-1 330.
- [20] Kenneth Falconer. *Fractal geometry: mathematical foundations and applications* [M]. England: Wiley, 2003: 23-30.
- [21] 杨宇, 孙哈森, 彭小东, 等. 煤层气储层孔隙结构分形特征定量研究 [J]. *特种油气藏*, 2013, 20(1): 31-33.
Yang Yu, Sun Hansen, Peng Xiaodong, et al. Quantitative study on fractal characteristics of the structure of CBM reservoir [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2013, 20(1): 31-33.
- [22] 陈伟, 吴智平, 侯峰. 临南洼陷临商断裂带与油气成藏的关系 [J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(2): 25-28.
Chen Wei, Wu Zhiping, Hou Feng. Relationship between hydrocarbon accumulation and Linshang fault zone in Linnan area, Huimin depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(2): 25-28.
- [23] 郭颖, 倪金龙. 利用等效孔隙度法恢复沉积盆地残余地层厚度 [J]. *油气地质与采收率*, 2012, 19(3): 42-45.
Guo Ying, Ni Jinlong. Paleo-thickness recovery of residual strata in sedimentary basin by equivalent porosity method—case of Huimin depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2012, 19(3): 42-45.
- [24] 荣元帅, 李新华, 刘学利, 等. 塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏多井缝洞单元注水开发模式 [J]. *油气地质与采收率*, 2013, 20(2): 58-61.
Rong Yuanshuai, Li Xinhua, Liu Xueli, et al. Discussion about pattern of water flooding development in multi-well fracture-cavity units of carbonate fracture-cavity reservoir in Tahe oilfield [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2013, 20(2): 58-61.